



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1679-0154

Dezembro, 2008

Documentos 76

Estimativa da radiação
solar global diária em Sete
Lagoas, MG baseada em
dados de insolação

Williams Pinto Marques Ferreira

Sete Lagoas, MG
2008

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45 CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG

Caixa Postal 151

Fone: (31) 3027 1100

Fax: (31) 3027 1188

Home page: www.cnpms.embrapa.br

E-mai: sac@cnpms.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Antônio Carlos de Oliveira

Secretário-Executivo: Paulo César Magalhães

Membros: Carlos Roberto Casela, Flávia França Teixeira, Camilo de Lelis Teixeira de Andrade, José Hamilton Ramalho, Jurandir

Vieira Magalhães

Supervisor editorial: Clenio Araujo

Revisor de texto: Clenio Araujo

Normalização bibliográfica: Maria Tereza Rocha Ferreira

Editoração eletrônica: Tânia Mara Assunção Barbosa

1ª edição

1ª impressão (2008): 200 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Ferreira, Williams Pinto Marques.

Estimativa da radiação solar diária em Sete Lagoas-MG baseada em dados de insolação / por Williams Pinto Marques Ferreira. – Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008.

19 p. : 14,8 x 21 cm. (Documentos/ Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154, 7)

1. Radiação solar – Sete Lagoas. I. Título. II. Série.

Sumário

Introdução	5
Material e Métodos	6
Resultados e Discussão	9
Conclusões	15
Referências Bibliográficas	16

Estimativa da radiação solar global diária em Sete Lagoas-MG baseada em dados de insolação

Williams Pinto Marques Ferreira¹

Introdução

O sol é a principal fonte de energia para o nosso planeta, pois fornece 99,97% da energia presente na biosfera (FERREIRA, 2006). O conhecimento da Radiação Solar Incidente "R " que chega à superfície da Terra é necessário para diversos estudos de agrometeorologia, engenharia agrícola etc., entre os quais pode-se destacar o balanço de calor e de balanço d'água (SILVA et al., 1990). A pequena rede de radiômetros instalados no Brasil, devido aos altos custos destes equipamentos registradores, faz com que o monitoramento da radiação solar se restrinja a órgãos públicos e a grandes empresas privadas. Tal fato tem estimulado os pesquisadores a fazer uso de modelos empíricos, dentre os quais destaca-se o proposto por ÅNGSTRON (1924), para estimativa da radiação solar que consideram outros parâmetros meteorológicos como insolação, ou seja, os dados diários do número de horas do brilho solar (n), comumente obtidos nos heliógrafos (SANTOS et al., 2003).

¹Embrapa Milho e Sorgo. C. Postal 151. 35701-970 Sete Lagoas, MG. williams@cnpms.embrapa.br

Várias pesquisas mostram que os coeficientes “a” e “b” da equação de *Ångström* variam de região para região e, dentre os fatores que influenciam na variação desses parâmetros, estão a latitude, a umidade do ar e a altitude. O fator estação do ano influencia na energia recebida em determinado local devido ao movimento da Terra em torno do sol descrever uma órbita elíptica (FERREIRA, 2006). No Brasil, já foram determinados os valores desses coeficientes para vários locais diferentes, estabelecendo a relação entre R_g e “n” (TUBELIS e NASCIMENTO, 1980; ALVES et al., 1981; ESPINOLA SOBRINHO e IZÍDIO, 1993; FONTANA e OLIVEIRA, 1996; DANTAS et al., 2003; PODESTÁ et al., 2004; SANTANA et al., 2004; SAMANI, 2004; CONCEIÇÃO e MANDELLI, 2006).

Para Sete Lagoas, FERREIRA (2006), em um estudo estatístico descritivo da radiação solar considerando o histórico de 80 anos de dados de uma estação convencional, obteve valores diários de radiação solar com base em dados de insolação, em que os coeficientes empíricos “a” e “b” foram obtidos a partir de regressão linear para todo o período estudado. Logo, o presente trabalho tem como objetivo determinar os parâmetros “a” e “b” do modelo linear de *Ångström* e avaliar, com base em dados de radiação solar de uma estação automática, o desempenho deste modelo na estimativa diária da radiação solar incidente em Sete Lagoas-MG.

Material e Métodos

O modelo de estimativa de radiação solar foi testado e avaliado com sequência de anos distintos dentro da mesma série de dados (1999-2007), baseado nos valores diários de radiação solar incidente R_g e da insolação diária “n” registrados nas

estações meteorológicas automática, pertencente à Embrapa Milho e Sorgo, e convencional, pertencente ao 5º Disme, ambas localizadas na Embrapa Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas-MG, a 19°28'S e 44°15'W e instalada a 732 m de altitude.

A partir do banco de dados, foi aplicado modelo de *Ångström* para os valores anuais e mensais, utilizando equações de regressão linear ajustadas pelo método dos mínimos quadrados (VIANELLO e ALVES, 2000):

$$\frac{R_g}{R_o} = a + b \frac{n}{N} \quad (1)$$

em que " R_g " é a irradiância solar global (MJ.m^{-2}), " n " o número de horas de insolação, " R_o " a irradiância solar global diária incidente numa superfície horizontal paralela à superfície do solo localizada no topo da atmosfera (MJ.m^{-2}), " a " e " b " os coeficientes empíricos obtidos da equação de regressão linear para Sete Lagoas-MG e " N " é a duração astronômica do período diurno, ou seja, o número de horas de brilho solar possível, o qual foi obtido de valores tabelados em função da latitude e da época do ano, que vai de 1 a 365 ou 366 se o ano for bissexto (VIANELLO e ALVES, 2000). A relação R_g / R_o é denominada neste estudo como índice de claridade (I_c).

Os valores de densidade de fluxo de radiação solar global R_g foram obtidos de medições realizadas a partir de um radiômetro (LI-200X *Pyranometer*) e os valores de insolação " n " foram obtidos a partir de um heliógrafo (Fuess). A R_o diária foi calculada pela seguinte equação:

$$R_o = \frac{0,0864}{\pi} S \left(\frac{\bar{d}}{d} \right)^2 H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H \quad (2)$$

em que $\left(\bar{d}/d\right)^2$ expressa a variação da densidade de fluxo de radiação que atinge a superfície normal aos raios, no topo da atmosfera, em virtude da distância variável da Terra em relação ao Sol, na ausência da atmosfera, ϕ a latitude e δ a declinação do sol, "S" é a constante solar média (1.367 W.m^{-2}) e "H" o ângulo horário (expresso em radianos), que é calculado pela expressão:

$$H = \arccos[-\operatorname{tg}\phi \times \operatorname{tg}\delta] \quad (3)$$

Visando a avaliação do desempenho do modelo para a estimativa da irradiância solar, foram realizados testes comparativos entre a metodologia proposta e os valores efetivamente observados. Dois índices estatísticos de ajuste foram, então, utilizados para o teste do modelo: o de precisão, usando o coeficiente de correlação "r"; e o de exatidão "d" (índice de concordância), proposto por WILLMOTT et al., (1985):

$$d = 1 - \frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum \left(\left| Pi - \bar{O} \right| + \left| Oi - \bar{O} \right| \right)^2} \quad (4)$$

em que Pi são os valores estimados, Oi os valores observados e O a média dos valores observados. Em razão dos índices estatísticos "r" e "d" não quantificarem os erros de exatidão e precisão, foram determinados os indicadores erro absoluto médio (EAM) e raiz quadrada do erro quadrado médio (RQEQM), os quais fornecem subsídios sobre o desempenho do modelo (JACOVIDES e KONTOYANNIS, 1995). A RQEQM e o EAM foram calculados de acordo com as equações a seguir:

$$RQEQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_i^N (P_i - O_i) \quad (6)$$

em que N é o número de observações.

Foi também utilizado o índice “c”, o qual reúne os índices de precisão “r” e de exatidão “d”, para avaliar o desempenho do método, CAMARGO e SENTELHAS (1997):

$$c = r \times d \quad (7)$$

A interpretação do desempenho dos métodos pelo índice “c” é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Critério de interpretação do desempenho dos métodos pelo índice “c”.

Desempenho	“c”
Ótimo	> 0,85
Muito bom	0,76 – 0,85
Bom	0,66 – 0,75
Mediano	0,61 – 0,65
Sufrível	0,51 – 0,60
Mau	0,41 – 0,50
Péssimo	≤ 0,40

Resultados e Discussão

Com base nos dados dos anos de 1999 a 2004, o modelo ajustado para Sete Lagoas gerou a expressão $R_g = R_o (0,2825 + 0,4511n/N)$, Figura 1. A análise dos limites da equação mostra as características atmosféricas de Sete Lagoas quando o n/N tende a zero, situação de elevada nebulosidade, $I_{c_{\min}} = 0,28$, definindo o mínimo de radiação solar que incide na superfície terrestre local. E quando n/N tende a 1, situação de ausência total de nuvens ou máximo de horas de brilho solar, $I_{c_{\max}} = 0,73$ ($I_c = a + b$) definindo a transmissividade máxima da radiação solar. O maior valor de I_c observado foi 0,95 e o mínimo 0,01; confrontados com os $I_{c_{\max}}$ e $I_{c_{\min}}$, observa-se que a equação de *Ångström* tende a superestimar a R_g em dias completamente nublados e a subestimá-la em dias de céu totalmente limpo. Esse comportamento é visto na maioria das estimativas com o modelo de *Ångström*. Não obstante, o modelo apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,87 e um coeficiente de correlação igual a 0,95, indicando um bom ajuste dos dados.

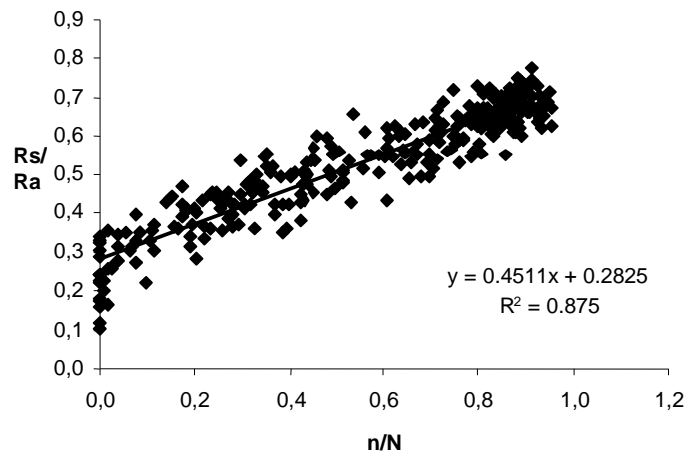


Figura 1. Regressão linear entre os valores diários de R_g/R_o (radiação solar incidente e radiação incidente no topo da atmosfera) e n/N (número de horas diárias de brilho solar e o número máximo possível de horas de sol diárias).

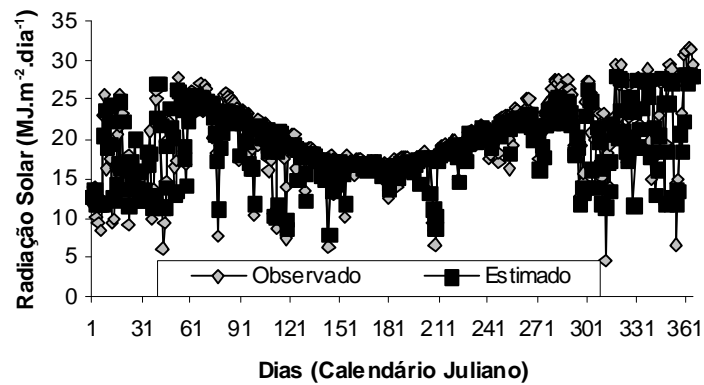


Figura 2. Valores médios diários de irradiância solar global (MJ.m^{-2}) observada e estimada, nos dados dos anos de 1999 a 2004, pelo modelo de *Ångström*.

A partir dos valores de coeficiente angular “b” e linear “a”, obtidos pelo modelo ajustado para Sete Lagoas, foi estimada a irradiância solar global anual e os valores encontrados foram comparados com os observados. De acordo com a **Figura 2**, pode ser identificada a tendência de os valores serem subestimados ao longo de todo o ano, sendo, porém, essa subestimativa mais evidente no período que compreende os meses de janeiro até meados de maio - aproximadamente 130 dias - e de meados de setembro até o mês de dezembro - totalizando aproximadamente 254 dias. Entretanto, apesar desse comportamento os valores observados e estimados foram muito próximos, indicando exatidão entre os mesmos, a qual foi expressa pelo valor “d” (índice de concordância de *Willmott*) na ordem de 0,9998.

Com o intuito de validar o modelo de estimativa da R_g , foi feita uma comparação estatística entre os valores medidos e os estimados por meio de regressão. Obteve-se, então, o gráfico de regressão, com r^2 de 0,83, com o artifício de a reta ser forçada a passar pela origem (**Figura 3**). A avaliação dos desvios dos valores de R_g estimada pelo modelo proposto por *Ångström* em relação aos valores observados foi realizada por meio de índices estatísticos de desempenho (JACOVIDES e KONTOYIANNIS, 1995).

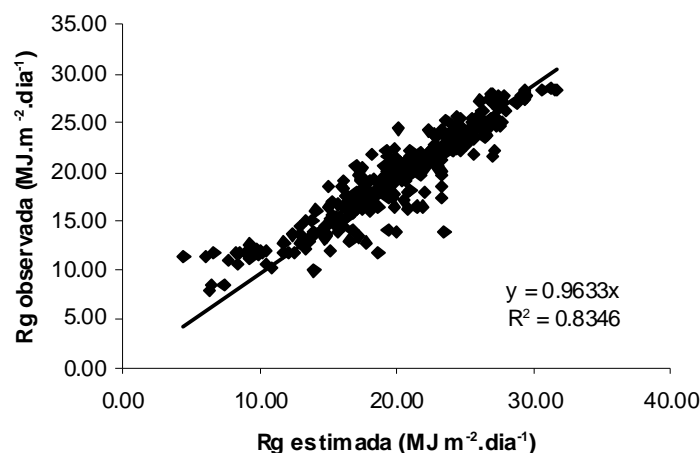


Figura 3. Regressão linear entre os valores diários de irradiância solar estimada e observada.

Os subsídios sobre o desempenho do modelo na estimativa da irradiância solar foram fornecidos pela RQEQM, que foi de 1,88 %. O modelo apresentou EAM de 38,31. Verifica-se que o modelo, em geral, apresentou bom desempenho, com exatidão acima de 99% expressa pelo índice de concordância de *Willmott* "d". Logo, a aplicação do modelo de estimativa da R_g utilizado para a estação meteorológica de Sete Lagoas apre-

sentou boa representatividade. Os valores de RQEQM e EAM sugerem que os erros cometidos pelo modelo de estimativa de irradiância solar são erros predominantemente aleatórios, sendo os valores de RQEQM e EAM, considerados na validação do modelo, aceitáveis.

Com o objetivo de aumentar a precisão da estimativa para diversos fins práticos, que exijam refinamento na determinação da R_g , podem ser utilizados os valores dos coeficientes

angular e linear ajustados mensalmente para Sete Lagoas, que apresentaram os coeficientes de determinação acima de 82%, assinalando boa precisão na estimativa da irradiância global local em base mensal (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes lineares (a), de declividade (b) e de determinação (r^2) das retas de regressão mensais e o anual entre a insolação diária e o número máximo possível de horas de brilho solar diário (n/N) e as irradiâncias solares global e incidente no topo da atmosfera (R_g/R_o).

Mês	a	b	r^2
Janeiro	0,3662	0,3655	0,8637
Fevereiro	0,3326	0,4094	0,8329
Março	0,2652	0,4913	0,8257
Abril	0,3085	0,3729	0,8925
Maio	0,3052	0,4210	0,8423
Junho	0,4588	0,0287	0,7229
Julho	0,3650	1,0278	0,7334
Agosto	0,2011	1,5809	0,9112
Setembro	0,2518	0,5295	0,8661
Outubro	0,2468	0,4986	0,8776
Novembro	0,2710	0,4404	0,8653
Dezembro	0,2848	0,4540	0,8760
Anual	0,2825	0,4511	0,8750

No exame dos coeficientes, nota-se uma variação entre 0,2011 e 0,4588 para os coeficientes lineares (a), enquanto os valores mensais do coeficiente de declividade da reta (b) variaram entre 0,3655 e 1,5809, apresentando maior oscilação do que os valores de "a", sendo que os maiores valores ocorreram nos meses mais frios do ano, de forma semelhante ao encontrado por CONCEIÇÃO e MANDELLI (2006) e por FONTANA e OLIVEIRA (1996). Assim, em termos mensais nota-se que no mês de junho, quando a razão de insolação tende a zero em condições de dia completamente nublado, a mínima radiação que

incide sobre a área de estudo local corresponde a 4,05% da radiação incidente no topo da atmosfera. Por outro lado, na ausência de nuvens durante o dia, quando “n” tende a se igualar a N, a máxima radiação que incide sobre Sete Lagoas equivale a 78,13% da radiação incidente no topo da atmosfera que ocorreu no mês de setembro.

O desempenho do modelo mensal e anual para a relação entre a R_g observada e estimada é apresentado na Tabela 3. Com relação à R_g estimada, os menores valores foram observados nos meses mais frios, entre maio e julho, e os maiores entre setembro e março. Os valores estimados apresentaram comportamento semelhante ao longo do ano quando comparados aos encontrados por FERREIRA (2006), sendo, entretanto, ligeiramente superiores. De acordo com os resultados mensais, o modelo foi classificado como “Muito bom” para o mês de janeiro e “Ótimo” para os demais meses, assim como o modelo anual. Os coeficientes de determinação mensais (r^2) variaram de 0,7334 a 0,9112. Deste modo, observa-se que a utilização de modelos mensais ocasionou pouca diferença no desempenho das estimativas, fazendo com que o modelo anual, $R_g = R_o(0,2825 + 0,4511n/N)$, seja adequado para uso em qualquer época do ano na região de Sete Lagoas.

Tabela 3. Valores médios mensais e anual da radiação solar global incidente R_g medida e estimada e dos coeficientes de determinação r^2 e de desempenho “c” para Sete Lagoas.

Meses	Rg (MJ m ⁻² dia ⁻¹)		r^2	c	Classificação do Desempenho
	Medida	Estimada			
Janeiro	16,16	16,05	0,8637	0,821	Muito bom
Fevereiro	19,59	18,82	0,8329	0,919	Ótimo
Março	23,29	22,85	0,8257	0,990	Ótimo
Abril	18,26	18,21	0,8925	0,989	Ótimo
Maio	17,29	16,65	0,8423	0,985	Ótimo
Junho	16,40	16,30	0,7929	0,991	Ótimo
Julho	16,41	16,12	0,7334	0,995	Ótimo
Agosto	19,59	19,44	0,9112	0,992	Ótimo
Setembro	21,63	21,46	0,8661	0,987	Ótimo
Outubro	23,60	21,40	0,8776	0,992	Ótimo
Novembro	21,33	19,80	0,8653	0,973	Ótimo
Dezembro	23,27	21,95	0,8760	0,989	Ótimo
Anual	19,82	19,09	0,8750	0,974	Ótimo

Conclusões

A estimativa da irradiância solar global por meio da equação de *Ångstrom*, de acordo com os resultados obtidos quando avaliados por meio dos índices estatísticos de regressão, apresentou boa precisão e boa exatidão de acordo com o modelo de concordância de *Willmott*. Considerando o índice “c” de confiança, os resultados mostraram o desempenho do modelo entre “muito bom” e “ótimo”, sendo, portanto, indicado para uso na estimativa da irradiância solar mensal, assim como anual, para Sete Lagoas-MG.

Referências Bibliográficas

- ALVES, A. R.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C. et. al. Estimativa da radiação solar global diária a partir de dados de insolação, para Viçosa, Minas Gerais. **Revista Experientiae**, Viçosa, v. 27, n. 10, p. 211-222, 1981
- ANGSTRÖN, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 50, p. 121-126, 1924.
- CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. **Estimativa diária da radiação solar incidente com base no número de horas de brilho solar para a região de Bento Gonçalves, RS**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 12 p. (Embrapa Uva e Vinho. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento)
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras. v. 27, n. 6, p. 1260-1263, nov./dez., 2003.
- ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; IZÍDIO, L. R. Determinação dos parâmetros "a" e "b" da equação de Angstron para estimativa da irradiação solar global em Mossoró- RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8., 1993, Porto Alegre. **Resumos...** Santa Maria: UFSM, 1993. p. 147.

FERREIRA, W. P. M. **Radiação solar em Sete Lagoas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 21 p. (Embrapa Milho e Sorgo.Documentos, 58).

FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 27, p. 365-371, 1995.

PODESTÁ, G. P.; NÚÑEZ, L.; VILLANUEVA, C. A.; SKANSI, M. A. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 123, p. 41-53, 2004.

SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v.126, n.4, p.265-267, 2000.
Weiiss, A.; Hays, C.J. Simulation of daily solar irradiance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 123, p. 187-199, 2004.

SANTANA, C. E.; PEREIRA, F. A. C.; PAZ, V. P. S.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, G. X. S. Determinação dos coeficientes de Ångstrom-Prescott para o município de Cruz das Almas, BA. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 14., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABID, 2004. 1 CD-ROM

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FIORADAVANTE, C. D.; LIMA, R. C; VALERIO FILHO, W. V. Estimativa da radiação solar global diária em ilha solteira, São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., 2003, Goiânia. **Anais ...**Goiânia: SBEA, 2003. 1 CD-ROM

SILVA, Z. R.; CARVALHO, A. J. P. de; ALBUQUERQUE, I. M. de. Relação entre radiação solar e insolação na região de Pentecostes, Ceará. **Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 21 n. 1/2, p. 75-78 jun./dez. 1990.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1980. 374 p.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 2000. 448 p.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, Ottawa, v. 90, p. 8995-9005, 1985.